

MOTOR OTTO DIDACTICO DE CUATRO TIEMPOS CON RELACION DE  
COMPRESION VARIABLE

JOSE IGANCIO ARCINIEGAS GARCIA  
ALCIBIADES DE JESUS LOPEZ QUINTANA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

CORPORACION UNIVERSITARIA TECNOLOGICA DE BOLIVAR  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
CARTAGENA D. T. Y C.  
1996



Cartagena, 8 de abril de 1996

Señores  
COMITE PROYECTOS DE GRADO  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar  
Ciudad.

Apreciados señores:

Muy respetuosamente nos dirigimos a ustedes, con el fin de presentar a consideración para su estudio y aprobación el Trabajo de Grado titulado "MOTOR OTTO DIDACTICO DE CUATRO TIEMPOS CON RELACION DE COMPRESION VARIABLE" para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Agradecemos la atención prestada.

Atentamente,

JOSE I. ARCINIEGAS G.

ALCIBIADES DE J. LOPEZ Q.

Artículo 105 del Reglamento Académico.

La Corporación se reserva el derecho de propiedad intelectual de todos los Trabajos de Grado aprobados y no pueden ser explotados comercialmente sin su autorización.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

ANIBAL ARROYO, Ingeniero Mecánico.

DIONICIA GARCIA DE ARCINIEGAS, Ama de casa.

GLADYS QUINTANA, Ama de casa.

MANUEL ARCINIEGAS PRADA, Ganadero.

WALBERTO ROCA BECHARA, Ingeniero Mecánico.

WISTON ARCINIEGAS GARCIA, Administrador de Empresa

## CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCION	1
1. TEORIA DE LA DETONACION	5
1.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE LA DETONACION	9
1.1.1 Características del combustible	9
1.1.2 Condiciones de la mezcla	10
1.1.3 Relación de compresión	10
1.1.4 Instante del encendido y dispersión en el reglaje	10
1.1.5 Cámara de combustión	10
1.2 ESTRUCTURA MOLECULAR DEL COMBUSTIBLE	10
1.3 TEMPERATURAS DE AUTOENCENDIDO Y RETARDO DEL ENCENDIDO	12
1.4 AUTOENCENDIDO EN LOS MOTORES DE AUTOMOVIL	15
	Pág
1.5 EVALUACION DE LA TENDENCIA A LA DETONACION EN UN	

	MOTOR DE COMBUSTION	15
1.6	AUTOENCENDIDO EN UN MOTOR CON DIVERSAS RELACIONES DE MEZCLA	16
1.7	AUTOENCENDIDO EN UN DISPOSITIVO DE UNA SOLA CARRERA Y COMPRESION RAPIDA	18
1.8	REACCIONES DE PRELLAMA	19
1.9	VELOCIDAD DE LA LLAMA O VELOCIDAD DE COMBUSTION	25
1.10	RELACION AIRE-COMBUSTIBLE	26
1.11	RELACION DE COMPRESION	28
1.12	AJUSTE DEL ENCENDIDO	30
1.13	FORMA DE LA CAMARA DE COMBUSTION	31
1.13.1	Cabeza en T	32
1.13.2	Cabeza en L	32
1.13.3	Cabeza en F	32
1.13.4	Válvulas en cabeza	32
1.14	LOCALIZACION DE LAS BUJIAS	34
1.15	ENCENDIDO SUPERFICIAL	36
1.16	DETONACION POR ENCENDIDO SUPERFICIAL	37
1.17	PREENCENDIDO	38
1.18	EFFECTOS DE LA DETONACION	40
		Pág
1.18.1	Pérdida de potencia	40
1.18.2	Predicción del funcionamiento con detonación incipiente a partir de la temperatura y densidad finales	41

1.19	ELIMINACION DE LA DETONACION DE LA COMBUSTION	43
1.19.1	Enfriamiento de la mezcla de aire-combustible de admisión	43
1.19.2	Reducción del factor tiempo	45
1.19.3	Aditivos antidetonantes	46
1.19.4	Aditivos anti-depósitos contra encendido	47
1.20	EVALUACION DE UN COMBUSTIBLE	49
1.20.1	Relación de compresión de máxima utilidad y crítica	49
1.20.2	Indices de detonación ASTM-CFR	49
1.20.3	Indicadores de intensidad de la detonación	51
1.20.4	Métodos de laboratorio de evaluación de la detonación	52
1.20.5	Sensibilidad del combustible y severidad del motor	53
1.20.6	Mezcla de combustible	54
1.20.7	Ensayo del índice de octano en carretera	55
2.	CONCLUSIONES	56



## LISTA DE FIGURAS

	Pág
FIGURA 1. Variación con la relación de mezcla de la relación de compresión de detonación incipiente.	28
FIGURA 2. Influencia de la relación de compresión sobre la tendencia a detonar, indicada por el índice de octano y la presión en el colector de admisión.	29
FIGURA 3. Formas de la cámara de combustión.	33
FIGURA 4. Influencia del encendido superficial.	36

## GLOSARIO

**ADITIVO:** Sustancia que se añade a otra, como por ejemplo al aceite lubricante para motor, a fin de impartirle ciertas propiedades. Por ejemplo, un cierto producto químico puede ser adicionado a un lubricante para reducir su tendencia a la congelación por baja temperatura.

**AIRE:** Mezcla de gases que constituye la atmósfera terrestre y contiene aproximadamente 79% de nitrógeno, 20% de oxígeno y 1% de otros gases.

**FILTRO DE AIRE:** Dispositivo para separar partículas sólidas de una corriente de aire, como la entrada a un carburador, a una cámara de combustión o a un compresor.

**RELACION DE AIRE A COMBUSTIBLE:** Relación o razón del peso del aire al peso del combustible en una mezcla de estos materiales.

**ENTREHIERRO:** Espacio que separa dos partes, tales como los electrodos de una bujía de encendido o el estator y el rotor de una máquina eléctrica.

**FUGAS DEL CILINDRO:** Pérdida de compresión debida a fuga de gases por los anillos de un pistón.

**CARBON:** Sólido no metálico de color negro, duro (o suave), que se forma en la cámara de combustión sobre los electrodos de las bujías, válvulas, cabezas de cilindro, corona y anillos de pistón.

**CARBONIZAR:** Formarse depósitos de carbón dentro de la cámara de combustión o sobre una bujía.

**CARBURADOR:** Dispositivo que sirve para mezclar aire y combustible en la proporción adecuada a fin de producir una mezcla de fácil combustión.

**AHOGADOR:** Válvula de mariposa situada en el carburador que restringe la cantidad de aire entrante (y por tanto, ahoga o sofoca el carburador) y produce así el enriquecimiento de la mezcla para el arranque de un motor frío.

**COMBUSTION:** El proceso en que se quema una sustancia. Efecto de arder.

**CAMARA DE COMBUSTION:** Espacio o volument que hay en el interior del cilindro y que está limitado por la cabeza o corona del pistón, la superficie interna del cilindro y la culata o cabeza, cuando el émbolo se encuentra en su punto muerto superior.

**RELACION DE COMPRESION:** Relación o razón del volumen interior de un cilindro de motor, cuando el pistón está en su punto muerto inferior, al volumen que se tiene cuando dicho pistón está en su punto muerto superior.

**CARTER:** Parte del motor que encierra o envuelve el cigueñal.

**CIGUEÑAL:** Eje principal (acodado) de un motor que junto con la biela ( o las bielas) transforma en rotatorio el movimiento rectilíneo alternativo del pistón (o de los pistones).

**CILINDRO:** En un motor, cavidad de esta forma el el monobloque y dentro de la cual se mueve el pistón.

**MONOBLOQUE O BLOQUE DE CILINDROS:** Pieza maciza de metal en la que se forma o coloca el cilindro (o los cilindros) de un motor.

**CABEZA (O CULATA) DE CILINDRO:** Parte metálica atornillada en la parte exterior del monobloque. Cierra el extremo superior de un cilindro y forma parte principal de la cámara de combustión.

**DETERGENTE:** Sustancia química añadida a un aceite lubricante de motor para mejorar sus propiedades.

**DETONACION:** Es el resultado de la combustión demasiado rápida de la mezcla combustible. Ignición explosiva.

**GASOLINA ETILICA:** Gasolina a la que se le ha añadido etilo para retardar su rapidez de combustión e impedir la detonación o golpeteo en motores de alta compresión.

**EXPANSION:** Aumento de volumen de un gas, como el que ocurre cuando se enciende y arde la carga de mezcla combustible comprimida en el cilindro.

**MARCHA MINIMA:** Funcionamiento de un motor a una velocidad uniforme, pero la más baja posible.

**VALVULA DE MARCHA MINIMA:** Válvula de aguja que controla la mezcla combustible que llega al cilindro cuando el motor funciona en marcha mínima.

**INDICE DE OCTANO:** Número que indica la resistencia a la detonación o golpeteo de una gasolina. Se llama también, a veces, "octanaje".

## RESUMEN

La detonación es un fenómeno producido por la combustión instantánea de una porción de la mezcla encerrada en la cámara de combustión.

En este fenómeno la combustión se inicia normalmente con el salto de la chispa en la bujía, y el frente de llama progresa adecuadamente en la cámara. Llegado un momento determinado, una porción de mezcla sin quemar explota

violentamente, debido a la presión que sobre ella ejercen los gases quemados, que producen un aumento de temperatura, que puede llegar a alcanzar valores de inflamación espontánea de la mezcla para esas grandes presiones. Esta explosión violenta, comunica una presión percutora a la cabeza del pistón y la combustión se completa anticipadamente, lo que supone que el pistón y demás componentes del motor quedan sometidos a esfuerzos anormales que pueden dañarlos, aumentando al mismo tiempo las temperaturas de combustión, lo que a su vez puede provocar el autoencendido.

El autoencendido y la detonación son fenómenos distintos en cuanto a su origen, pero cualquiera de ellos puede estimular al otro, con los perjuicios

que puede ocasionar el motor, en el cual se produce un picado o ruido característico, que se oye según su intensidad como un ruido que oscila desde un suave tintineo a un fuerte martilleo.

Al tratar los combustibles se hizo referencia a la importancia de sus características antidetonantes. Trataremos ahora de las variables que influyen sobre la detonación, considerando constante el valor del NO del combustible.

Se disminuye la posibilidad de detonación de la siguiente forma:

- Reduciendo la relación de compresión, con la cual desciende la presión y la temperatura.
- Disminuyendo la temperatura de la mezcla a su entrada al cilindro o reduciendo la cantidad introducida, con lo que se hace menor la cantidad de calor desarrollada en la combustión.
- Disminuyendo la temperatura de las paredes de la cámara de combustión por medio del sistema de refrigeración, enviando el agua fría directamente a estas zonas.

- Empleando mezclas ricas o pobres para disminuir la temperatura de la llama.
- Retrasando el punto de encendido.
- Aumentando la turbulencia, con lo que el tiempo que emplea el frente de llama en recorrer toda la cámara de combustión es menor.
- Disminuyendo la longitud del recorrido de la llama en la cámara de combustión. Las cámaras hemisféricas, dada su geometría, son las más adecuadas a este efecto.

Las elevadas relaciones de compresión utilizadas en los motores actuales, dan lugar a que el peligro de aparición del picado sea mayor, pues aunque se utilice un combustible adecuado, cualquier anomalía en el motor puede ser causa de aparición de este fenómeno, como ocurre por ejemplo si el motor se calienta en exceso por suciedad en el radiador, o si el encendido se adelanta debido a un desreglaje. No obstante, contando con un funcionamiento

perfecto de todos los órganos del motor, la detonación pone límite a la máxima relación de compresión que puede utilizarse, de acuerdo con una calidad determinada del combustible.



Desde que salta la chispa en la bujía y comienza la inflamación de la mezcla aire-gasolina hasta su total combustión, transcurre un cierto tiempo que podemos cifrar por término medio en dos milisegundos. La chispa de encendido debe saltar con cierta antelación, para que la máxima presión obtenida por la combustión de la mezcla, alcance el pistón un poco después de sobrepasar el p.m.s. Si la chispa salta prematuramente la máxima presión de la combustión alcanza al pistón antes de llegar al p.m.s., siendo frenado en su movimiento ascendente ; si se produce demasiado tarde, la máxima presión alcanza el pistón cuando ya está lejos del p.m.s. en su carrera descendente. En ambos casos, la potencia del motor se ve disminuida en relación con el combustible consumido, produciéndose sobrecalentamiento del motor.

El punto de encendido se establece de manera que se obtenga la mayor potencia del motor con un mínimo consumo. Generalmente está referido al giro del cigüeñal y expresado en grados de giro de éste.

Considerando la velocidad de inflamación de la mezcla sensiblemente constante mientras su composición no varíe, el tiempo que transcurre entre la inflamación de ésta y su combustión completa, es más o menos el mismo ; sin embargo, la velocidad con que se mueve el pistón no es constante y, si el punto de encendido se mantiene en la misma posición ( unos grados antes

del p.m.s. ), con el aumento del número de revoluciones, en el mismo tiempo que dura la combustión, el pistón ha recorrido mayor espacio y la máxima presión obtenida lo alcanza cada vez más lejos del p.m.s. a medida que aumenta el régimen de giro, con la consiguiente disminución de potencia. Por este motivo, el punto de encendido debe desplazarse en el sentido de avance a medida que aumenta el régimen de giro del motor, para que la máxima presión de la combustión alcance siempre al pistón en el mismo punto.

El momento más favorable para el inicio de la combustión, no lo determina solamente el régimen de giro del motor. El tipo de construcción de éste, el combustible empleado, las condiciones de marcha ( carga del motor ), etc., desempeña también un importante papel. Así mismo, la forma y volumen de la cámara de combustión, el lugar donde se produce la chispa y la composición de la mezcla aire-gasolina, influyen en el punto de encendido.

Con una mezcla pobre ( proporción de aire mayor que la estequiométrica ), la velocidad de inflamación disminuye, por cuya causa, el punto de encendido ha de desplazarse en dirección al avance. Del mismo modo, cuando el motor no funciona a plena carga, sino con cargas parciales, la mezcla es menos inflamable y se quema más lentamente, por lo que ha de ser encendida antes.

Así pues, para obtener un buen rendimiento de los motores, el punto de encendido ha de variarse en función del régimen y de la carga. Esta misión la realizan los llamados dispositivos de avance al encendido, cuyas ejecuciones básicas son :

- Avance centrífugo : Actúa en función del régimen de giro del motor.
- Avance de vacío : Actúa en función de la carga del motor.

Estos dos dispositivos de avance actúan en combinación y sus mecanismos van situados en la cabeza del distribuidor de encendido.

Cuando un motor de encendido por chispa funciona en condiciones extremas, como son: cargas elevadas, adelanto al encendido, temperaturas ambientales altas, etc., puede originarse el fenómeno de la detonación.

La combustión normal de la mezcla aire-combustible se realiza con la formación de un frente de llama, que se propaga por capas desde la bujía, en todas las direcciones, produciéndose una cantidad de calor que hace aumentar la presión a la que se somete la mezcla no inflamada todavía y puede hacerla explotar en los casos extremos, lo que se conoce con el nombre de detonación y se traduce en una violenta vibración de las paredes de la cámara de combustión, diciéndose en este caso que el motor "pica".

Este picado es perjudicial ya que se puede ocasionar la rotura de los órganos móviles del motor, y supone una pérdida considerable del rendimiento.

El picado es la consecuencia de una combustión anormal que se produce tanto más fácilmente, tanto mayor es la relación de presión y depende fundamentalmente de las características antidetonantes del combustible.

Cuando un combustible puede soportar elevadas compresiones sin detonar, se dice que está dotado de un elevado poder antidetonante. La calidad de un combustible depende fundamentalmente de esta característica, cuya medida viene dada por el llamado número de octano (NO).

El valor del NO de un combustible carburante se determina de modo experimental comparándolo con combustibles de referencia constituidos por mezclas de heptano o isoctano. Para el primero, de baja resistencia a la detonación, se establece convencionalmente un NO igual a cero; mientras que para el isoctano, de elevada resistencia a la detonación se establece un NO igual a 100. Mezclados ambos combustibles en diversas proporciones se obtienen NO en toda la escala de 0 a 100.

Una mezcla al 50% en volumen de ambos hidrocarburos, tiene un NO = 50; mientras que una mezcla de 90% de isoctano y 10% de heptano tiene un NO = 90. Así pues, éstos dos hidrocarburos son empleados como combustibles de referencia para poder evaluar el NO de otros combustibles desconocidos.

El ensayo para determinar el NO de un combustible se realiza sobre motores contruidos especialmente para este fin. Estos motores son monocilindricos y permiten variar la relación de compresión durante su funcionamiento. Uno de los utilizados, marcado por la sigla CFR (perteneciente al comité corporativo para investigación de combustibles), establece unas determinadas condiciones de funcionamiento en el ensayo, durante el cual, se va aumentando paulatinamente la relación de compresión hasta que se produce la detonación. En sucesivas pruebas se determina la mezcla de heptano e isoctano, que para la misma relación de compresión produce un picado similar en intensidad, lo que se mide con un sistema eléctrico. El porcentaje del isoctano de esta mezcla representa el NO del combustible ensayado.

Se puede afirmar que cuanto más elevado sea el NO de un combustible carburante, mayor será su capacidad de resistir la detonación y mayor puede ser la relación de compresión utilizada en el motor; sin embargo, es de hacer notar que cada unidad de aumento en el NO, produce un efecto antidetonante mayor cuando dicho índice es más alto. Así, por ejemplo, un aumento de 90 a 91 NO, causa un efecto mayor que el de 30 a 31 NO.

La gasolina de NO inferior a 90 es la llamada normal y desde un NO = 90 se denomina super. Valores mayores de 100 NO dan las gasolinas extras.

Dado que los valores están tomados sobre dos hidrocarburos como el heptano y el isoctano, se comprende que pueden existir valores superiores a 100 e inferiores a 0, pues existen hidrocarburos de mayor poder antidetonante que el isoctano y menores que el heptano, como ocurre con el metano, de mayor poder antidetonante que el isoctano.

La resistencia de las gasolinas al picado depende de las características de los petróleos de procedencia y de los procesos de elaboración. Los hidrocarburos de la serie aromática y las isoparafinas son más resistentes al picado que los de la serie parafínicas. No obstante, la resistencia al picado de los combustibles no cumple de por sí con las exigencias de los motores actuales, por cuya causa se añaden a los combustibles en su elaboración, pequeñas cantidades de determinadas sustancias antidetonantes, como el tetraetilo de plomo, que añadido a la gasolina, es capaz de inhibir la detonación o combustión espontánea de la última parte de la mezcla comprimida, alargando el tiempo de reacción del combustible, es decir, el tiempo requerido por la última parte de la mezcla para explosionar.

Los antidetonantes son compuestos metalorgánicos que se desintegran con la presión y calor de la combustión, sin modificar por ello el poder calorífico del combustible.

Como sustancias antidetonantes se utilizan, además del tetraetilo de plomo ya citado, el tetrametilo de plomo, el pentacarbonilo de hierro, el tetracarbonilo de níquel y la anilina. Todos ellos son líquidos en condiciones ordinarias.

El tetraetilo de plomo es el más eficaz de todos ellos, pero rebasado en un porcentaje determinado en la mezcla, origina los inconvenientes de formación de depósitos de óxido de plomo ( cuyo poder corrosivo actúa sobre las paredes del cilindro, pistón, válvulas, etc.) y toxicidad de los vapores de combustible y gases de escape. Para evitar en parte estos inconvenientes se añaden a la gasolina, junto con el antidetonante, productos como el dibromuro de etilo o el dicloroetileno, que en la combustión reaccionan con los compuestos de plomo, dando lugar a sustancias que se evaporizan y salen con los gases de escape.

Actualmente, la utilización de aditivos, con base de plomo ha sufrido una regresión, pues ésta sustancia es vertida con los gases de escape y, dada su toxicidad, en lugares de intenso tráfico puede ser perjudicial para el organismo humano, pues al respirar el aire contaminado el plomo se acumula gradualmente en el organismo y alcanzando un cierto nivel puede ocasionar enfermedades del corazón, pulmones, cerebro, etc.

Lo anterior ha obligado a cambiar la estructura química de la gasolina y a modificar los motores para que puedan ser utilizados combustibles con adición de plomo o en porcentajes mínimos, lo que obliga a relaciones de compresión menores.



## INTRODUCCION

Desde que a Nikolaus August Otto se la otorgó la patente de un motor de combustión interna con ciclo de cuatro tiempos en 1876 , los motores de combustión interna han estado al servicio de la humanidad .

En esa época las máquinas de vapor ya tenían 178 años de utilizarse , eran de combustión externa y hasta fines del siglo pasado eran máquinas de gran tamaño que ocupaban demasiado espacio y eran difíciles de transportar . En comparación con ellas, el motor de combustión interna de Otto era pequeño y compacto y, por lo tanto se impuso rápidamente como sustituto del caballo. De ahí que los primeros automóviles se llamaron “carruajes sin caballos”, aunque en aquellos días no era raro encontrar uno de estos animales remolcando un “carro sin caballos” descompuesto .

La idea de un vehículo con locomoción propia constituyó un incentivo para inventores y fabricantes de modo que los coches sin caballos proliferaron , y a fines del siglo fueron un espectáculo frecuente en muchas ciudades .

El motor de combustión interna ofreció tantas ventajas que pronto fue la fuente preferida de fuerza motriz no sólo para el transporte por tierra, sino para otras aplicaciones, que no tardaron en desarrollarse. En la actualidad,

los motores de combustión interna de movimiento alternativo impulsan automóviles, embarcaciones, aeroplanos, segadoras de césped, bombas, generadores eléctricos, tractores, motocicletas, etc., además de una variedad de equipos agrícolas y de construcción, es decir, se utilizan casi en cualquier aplicación que requiera una fuente de potencia o fuerza motriz independiente.

Poco después de su desarrollo, el ciclo de cuatro tiempos empezó a conocerse como “ciclo de Otto”, en honor de su inventor. Para muchos inventores, el advenimiento del motor de cuatro tiempos representó un desafío y empezaron a modificar o perfeccionar el motor Otto.

En 1878, dos años después de que Otto obtuvo su patente, se emitió otra para un motor con ciclo de dos tiempos. Este tipo de motor no requería válvulas, levantaválvulas, guías, resortes, balancines, árbol de levas o cadena de distribución. Además, desarrollaba una carrera de fuerza o impulsión en cada revolución de su eje, en vez de una por cada dos revoluciones, como sucede en el motor con ciclo de cuatro tiempos. Posteriormente, en 1892, un año después de la muerte de Otto, el Dr. Rudolph Diesel patentó un motor que utilizaba el calor del aire altamente comprimido para encender una carga de combustible inyectada en el cilindro. Lo llamó “motor de encendido por compresión” que posteriormente fue llamado motor Diesel.

Muchos inventores pensaron que el trepidante movimiento de vaivén del pistón era muy ineficiente y desperdiciaba energía, buscaron superar esta deficiencia ideando un motor de combustión interna rotatorio.\*

En 1900, Cooley inventó y construyó un motor con rotor en forma epitrocoidal el cual giraba sobre un solo eje; en 1943, Millary patentó una máquina de rotación planetaria y eje interno, en la que el rotor interior tenía forma hipotrocoidal. Sin embargo, la complicada configuración geométrica y los problemas de cierre hermético resultaron demasiado costosos en comparación con el sencillo motor con pistón de movimiento alternativo. Finalmente, en 1957, Felix Wankel, ayudado por Ealter Froede, desarrolló el ahora llamado motor Wankel, sólo entonces los motores rotatorios de combustión interna pudieron competir con el motor de pistón recíprocante.

Ya que el motor de combustión interna se usa en forma tan extensa y generalizada, es obligado saber todo acerca de él .

Este trabajo ofrece los conocimientos y las herramientas necesarias para estudiar, probar y analizar las variables necesarias y los fenómenos producidos, específicamente el fenómeno de la detonación, en el funcionamiento de un motor de Ciclo Otto .

El equipo utilizado para realizar las acciones anteriores, es un motor de ciclo Otto de tres caballos de potencia marca “Briggs and Stratton”, pequeño y ligero del tipo que se emplea en cortadoras de césped. El motor se proporciona completo con tanque de combustible, arrancador de tirón y

silenciador . Su diseño es de cabeza plana con monobloque ( o bloque del cilindro ) de hierro colado, refrigerado por aire utilizando aletas de aluminio. La cabeza es reemplazada por un mecanismo que permite variar la relación de compresión durante el funcionamiento del motor, las valvulas y el carburador se pueden quitar facilmente.

Debido a su relación de compresión variable, durante su funcionamiento, este motor reproduce a escala de 1/100 el funcionamiento y las características de flujo de combustible de motores de ciclo Otto de 150 a 300 HP. Además de crear las condiciones necesarias para obtener el fenómeno de la detonación.

Las pruebas y experimentos desarrollados son interesantes y provechosos, ya que la teoría indispensable se combina con el adiestramiento práctico.

Se proporciona un glosario para consultas rápidas, que incluye definiciones de términos o valores calculados tales como la presión media efectiva al freno, consumo específico de combustible, eficiencia térmica y volumétrica, éstos se dan junto con una forma simplificada de las ecuaciones usadas para los cálculos presentados .

## 1. TEORIA DE LA DETONACION

El término detonación se ha utilizado extensamente en el estudio del picado de combustión en el motor de combustión interna encendido por chispa. También se utiliza al estudiar la detonación de una mezcla de combustible en tuberías largas donde la combustión normal se transforma en una onda de detonación que se propaga a una velocidad entre 2000 y 3000 mts/seg y produce la detonación de la mezcla no quemada, al ser atravesada por la onda.

Como el que sea una onda de detonación la sola causa del picado de combustión de la mezcla final en un motor, no es muy probable, a causa de la poca longitud recorrida por la llama y las velocidades normales de llama de mezclas combustibles, se utiliza el término picado de combustión para designar el picado común de un motor, resultante de la combustión.

El estudio de la detonación en los motores de combustión interna encendidos

por chispa fue iniciado por Kettering<sup>1</sup> en los Estados Unidos y Ricardo<sup>2</sup> en Inglaterra, ellos comprobaron que este fenómeno limitaba la relación de compresión a la que podía funcionar un motor.

Un motor de gasolina que no detona con el estrangulamiento muy abierto, puede hacerse detonar aumentando la relación de compresión, utilizando carburantes de poder antidetonante bajos o avanzando el punto de encendido; de aquí el nombre de Picado de Chispa. Cambios menores de estas variables en la dirección indicada dan, generalmente, una detonación incipiente. Cambios mayores aumentan la severidad de la detonación, y pueden dar lugar al preencendido, el sobrecalentamiento, vibración y pérdida de potencia, resultando el motor deteriorado.

El proceso de combustión no turbulento se inicia en pequeños núcleos entre los electrodos de la bujía y se propaga casi radialmente a partir de este punto. Una elevada turbulencia de la carga distorcionará apreciablemente el proceso de combustión, se tienen suposiciones que dicen que la combustión se origina en una zona relativamente estrecha, denominada *frente de llama*, y otros que la combustión continúa después que el *frente de llama* ha pasado a través de

---

<sup>1</sup> C. F. Kettering, More Efficient Utilization of Fuel, SAE Journal, 4, 263 (1919).

<sup>2</sup> H.R. Ricardo, Paraffin as Fuel, Automobile Engr., 9 2 (1919)  
la carga. Una falta de homogeneidad en la mezcla, que siempre tiene lugar en cierto grado, da como resultado una apreciable poscombustión.

La elevada temperatura de los productos formados en el *frente de llama* produce una expansión que comprime la fracción quemada situada detrás del

*frente de llama*, y la fracción no quemada situada delante. Esto hace que se eleve la temperatura de la fracción no quemada, que puede llegar al autoencendido y producir una elevación local de la presión que da lugar al sonido de la detonación. Esta teoría la dio originalmente Ricardo en 1919.

Según Withrow<sup>3</sup> y Boyd<sup>4</sup>, cuando se produce la detonación, tiene lugar una inflamación repentina de la última porción de la mezcla sin quemar. En algunos casos la llama aparece en el mismo instante en toda la última porción de la mezcla, mientras que en otros la combustión se inicia en la fracción sin quemar situada delante del *frente de llama*, propagándose la combustión hacia la llama inicial por una parte y por la otra hacia la pared del cilindro.

Rassweiler<sup>5</sup> afirma que en el proceso sin detonación el *frente de llama* progresa más o menos ordenadamente a través de la cámara de combustión

---

<sup>3</sup> L. Withrow, W. G. Lovell y T. A. Boyd, Following Combustión in the Engine by Chemical Means, Ind. Eng. Chem., 22, 945 (1930).

<sup>4</sup> L. Withrow y T. A. Boyd Photographics Study of Combustion and Knock in a Spark-ignition Engine, NACA Rept., 622, 1938.

<sup>5</sup> L. Withrow y G. M. Rassweiler, Slow Motion Shows Knocking and Nonknocking Explosions, SAE Trans., 39, 297 (1936).

que en el proceso con detonación aparece prácticamente el mismo progreso de la llama para parte del recorrido de la misma, pero finaliza con una inflamación repentina de la fracción no quemada. La última parte de la mezcla puede autoencenderse en varios puntos, ya que la mezcla no es nunca homogénea, y esto puede manifestarse por un aumento de la

velocidad de propagación de la llama, aunque en realidad, lo que aumenta la velocidad de quemado (caudal en masa quemado) es el incremento de área de la superficie de la llama.

Cuando se origina la detonación aparecen presiones locales comparativamente elevadas como resultado de la combustión casi instantánea de la última fracción de la mezcla. Este desequilibrio de presiones en la cámara de combustión tiene una duración muy breve, ya que la última fracción de la mezcla, se expansiona casi inmediatamente, lo que iguala las presiones. Esta onda de presión viaja a la velocidad del sonido, en un sentido y en otro a través de los gases en la cámara de combustión, hasta que se disipa debido al efecto del rozamiento. La frecuencia depende de la velocidad de las ondas y del espacio en que están confinadas, y el sonido de la detonación puede venir determinado por la frecuencia de las ondas de presión.

El espacio que la onda sonora puede recorrer en la cámara de combustión de un motor es generalmente menor de 15 cm en los de automóvil y de aviación. Por lo tanto, la frecuencia natural de las ondas de presión debidas a la detonación estará en el intervalo de 3000 a 5000 por segundo.

También están siempre presentes ondas de presión distintas de las producidas por la combustión extremadamente rápida de la última parte de la mezcla .



El proceso de combustión normal produce continuamente ondas de presión de intensidad variable que chocan con las paredes de la cámara de combustión y se reflejan volviendo hacia la llama disminuyendo o aumentando su intensidad, dependiendo de la posición del frente de la llama y del diseño de la cámara de combustión.

El flujo de la mezcla hacia el interior del cilindro y el movimiento del pistón dan lugar a ondas de presión. Consecuentemente, diversas ondas de presión dificultan el progreso de la llama aún en la combustión sin detonación, influenciando también el autoencendido de la mezcla final en la combustión con detonación.

## 1.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE LA DETONACIÓN

1.1.1 Características del combustible : Estructura molecular, temperatura de autoencendido, reacciones de prellama y velocidad de combustión o velocidad de la llama.

1.1.2 Condiciones de la mezcla : Relación aire-combustible y temperatura del aire de admisión, densidad y distribución de la mezcla aire-combustible.

1.1.3 Relación de compresión : Condiciones de la mezcla final, tiempo de cierre y apertura de las válvulas, presiones en los colectores y relación de compresión permisible.

1.1.4 Instante del encendido y dispersión en el reglaje.

1.1.5 Cámara de combustión : Diseño, situación de las bujías, material y estado superficial.

## 1.2 ESTRUCTURA MOLECULAR DEL COMBUSTIBLE

Los carburantes derivados del petróleo están constituidos por muchos hidrocarburos de estructuras moleculares diferentes o distintas disposiciones de los átomos en la molécula. Estas diferencias en la estructura de las moléculas tiene una gran influencia sobre la tendencia de la combustión de la mezcla aire-combustible a producir la detonación en un motor. Esta tendencia se mide mediante la *relación de compresión crítica* de un motor, en condiciones de funcionamiento especificadas, bajo cuya relación la mezcla de aire-combustible especificada dará lugar a una detonación incipiente. La relación entre la estructura molecular de las parafinas y la tendencia a la detonación viene indicada por las siguientes reglas :

- Al aumentar la longitud de la cadena de carbonos aumenta la tendencia a la detonación.
- La centralización de los átomos de carbono disminuye la tendencia al picado.

- La adición de radicales metilo ( $\text{CH}_3$ ) a los lados de la cadena de carbonos y en el carbono de posición 2 o en el central disminuye la tendencia a la detonación.

Los hidrocarburos alifáticos saturados mostraron mayor tendencia a la detonación que los hidrocarburos no saturados investigados, con excepción del etileno, acetileno y propileno. Así, el acetileno ( $\text{C} \equiv \text{C}$ ) detona con mucha más facilidad que el etano ( $\text{C} - \text{C}$ ).

Las investigaciones realizadas con hidrocarburos aromáticos y nafténicos han mostrado las siguientes relaciones entre la tendencia a la detonación y la estructura molecular :

- Los naftenos tienen una tendencia a la detonación mayor que los aromáticos correspondientes. Así, el ciclohexano ( $\text{C}_6\text{H}_{12}$ ) tiene una tendencia a la detonación mucho mayor que el benceno ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ).
- Un doble enlace tiene un pequeño efecto antidetonante, mientras que dos o tres dobles enlaces generalmente dan lugar a una tendencia a la detonación apreciablemente menor.
- Aumentando la longitud de una cadena lateral crece la tendencia a la detonación en ambos grupos de carburantes, mientras que la ramificación de una cadena lateral disminuye la tendencia a la detonación.

### 1.3 TEMPERATURAS DE AUTOENCENDIDO Y RETARDO DEL ENCENDIDO

El autoencendido de una mezcla combustible tiene lugar cuando su temperatura y densidad son suficientemente elevadas para que las reacciones de prellama se produzcan a una velocidad tal que la energía química se libere más rápidamente de lo que se disipa por transferencia calorífica o por cualquier otra forma. Esto aumenta, tanto la velocidad de las reacciones de prellama, como la temperatura hasta que se produce la llama y la rápida reacción. Así, tiene lugar un apreciable retardo de tiempo entre el instante en que se alcanza la temperatura de autoencendido y la aparición de la llama, que depende de la mezcla, del diseño del motor y de las condiciones impuestas.

El retardo del encendido es el tiempo requerido para que una mezcla de carburante y de aire se autoincendie, cuando está sometida a cierta temperatura suficientemente elevada y a una presión determinada.

Los estudios del encendido espontáneo de la mezcla de heptano-aire en un proceso de flujo permanente han confirmado el periodo de la reacción de prellama y el retardo del encendido. Además, el encendido espontáneo ocurrió al final del ensayo a una temperatura de la mezcla apreciablemente menor (debida a la pérdida de calor hacia el tubo) que la máxima que tuvo lugar después de las reacciones de prellama. Posteriormente se realizaron

experimentos en tubo manteniendo la temperatura del tubo igual a la temperatura de la mezcla de prellama máxima. Esto redujo la pérdida de calor a un mínimo.

Se han utilizado dispositivos de una sola carrera de compresión rápida para determinar el retraso del encendido de las mezclas de aire-combustible. Normalmente, se han estudiado mezclas de aire-combustibles vaporizadas, midiéndose el retraso del encendido desde el final de la carrera de compresión hasta la iniciación del autoencendido. En todos los procesos de retraso del encendido se encontró que el retraso del encendido  $\tau$  era función de la temperatura y de la presión :

$$\tau = f^* (e^{-E/RT} / p^b)$$

donde E es la energía de activación.

Fenn y Calcote<sup>6</sup>, a partir de sus estudios de la energía de activación en las llamas de los quemadores han concluido que :

*No importa el orden de la reacción, el factor determinante de la velocidad parece ser una exponencial de la energía de activación.*

Así, el trabajo químico total requerido para el autoencendido es :

$$\text{Trabajo químico} = \int_{t=0}^{t=\tau} (1 / \tau) dt = \int_{t=0}^{t=\tau} e^{-E/RT} / p^b dt$$

Para procesos a presión constante la ecuación anterior puede escribirse como:

$$\text{Log } \tau = E / RT + \text{constante}$$

que indica que  $E / R$  puede calcularse a partir de la pendiente de la gráfica de los  $\text{Log } \tau$  en función de  $1 / T$ .

<sup>6</sup> J. B. Fenn y H. F. Calcote, activation Energies in High Temperature Combustion, in <<Fourth Symposium on Combustion>>, the Williams & Wilkins Company, Baltimore, 1953

#### 1.4 AUTOENCENDIDO EN LOS MOTORES DE AUTOMÓVIL

El motor de automóvil aspira la mezcla de aire-hidrocarburo, la combina con los productos de combustión que quedan, comprime ésta mezcla, que alcanza su temperatura y presión y se produce el autoencendido o se enciende mediante una chispa posteriormente, y a continuación se expande, etc., repitiéndose el ciclo. Un aumento de la relación de compresión o una disminución del número de octano del carburante puede provocar el autoencendido de la mezcla antes del final de la compresión. Así, para cada mezcla y condiciones del motor dadas, existe una historia definida temperatura-presión-tiempo, que da lugar al trabajo químico requerido para el autoencendido

#### 1.5 EVALUACIÓN DE LA TENDENCIA A LA DETONACIÓN EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN

La tendencia a detonar de un carburante determinado en un motor dado bajo diversas condiciones puede determinarse mediante un solo ensayo que dé lugar a la detonación en la combustión. Para determinar la historia de la presión y la temperatura de la porción sin quemar de la mezcla, desde, aproximadamente,  $60^\circ$  de ángulo del cigüeñal antes del TDC hasta el ángulo en que se produce la detonación, se requiere del empleo de cartas registradoras de la presión en función del tiempo y realizar una estimación de la temperatura de la mezcla en algún punto próximo al proceso de compresión real.

#### 1.6 AUTOENCENDIDO EN UN MOTOR CON DIVERSAS RELACIONES DE MEZCLA

La relación de mezcla de *n*-pentano-aire para originar la máxima detonación en un motor de encendido por chispa es ligeramente más rica que la relación de mezcla estequiométrica. Por tanto, se requiere una relación de compresión más baja para una detonación incipiente o límite.

El aumento o disminución de la relación aire-combustible a partir de la relación de detonación máxima requiere un aumento de la relación de compresión para producir la detonación límite.

Las relaciones de compresión necesarias para el autoencendido de mezclas son apreciablemente más elevadas para el encendido por compresión que para el encendido por chispa, ya que únicamente la energía de la reacción de prellama aumenta el proceso de compresión normal. En ambos procesos las relaciones de compresión mínimas se obtienen aproximadamente para una relación aire-combustible de 13,5 : 1, correspondiente a la potencia máxima. No obstante, el proceso de encendido por compresión tiene otro mínimo en la relación de compresión para una relación aproximada aire-combustible de 28 : 1.

Se indican varios intervalos para productos de reacción diferentes, con relaciones de compresión más bajas que las necesarias para la combustión completa de mezclas muy pobres.

Los ensayos de motores han puesto de manifiesto que, al aumentar la temperatura entre temperaturas del colector de admisión y de escape, en todos los combustibles ensayados excepto en el benceno y el alcohol tienen lugar reacciones de prellama. Al aumentar la temperatura de la mezcla se obtuvo un aumento en la elevación de temperatura máxima que tenía lugar para una riqueza de mezcla incrementada. Un aumento en la velocidad del motor reduce la cantidad de la reacción de prellama, por reducirse el tiempo por ciclo.



Un análisis de los productos obtenidos al ensayar en un automóvil un motor con una relación de compresión de 6.17 : 1 y alimentado con una mezcla del 75 por 100 de isooctano en *n*-heptano con aire (A/F igual a 14.3 : 1) y una temperatura de la mezcla en el colector de 149° C, dio como resultado un cracking del combustible y una polimerización de algunos de los fragmentos del combustible.

### 1.7 AUTOENCENDIDO EN UN DISPOSITIVO DE UNA SOLA CARRERA Y COMPRESIÓN RÁPIDA.

Los retardos del encendido para varias mezclas de aire-vapor, sujetas a una compresión muy rápida en un compresor de una sola carrera y mantenidas a continuación en el estado final comprimidas muestran que el aumento de la presión y de la temperatura tiene el efecto de disminuir el retardo del encendido, indican un incremento apreciable en dicho retardo al añadir plomo-tetraetilo y demuestran que la relación aire-combustible afecta el retardo del encendido. Estos retardos en el encendido son notablemente menores que los obtenidos con carburante líquido pulverizado en el interior del aire comprimido y caliente, ya que el proceso de evaporación requiere un tiempo apreciable; ellos son más cortos que los retardos verdaderos del encendido, particularmente para las temperaturas y presiones más elevadas, ya que una apreciable cantidad de la reacción de prellama tiene lugar cerca

del final del proceso de la compresión rápida y este tiempo de reacción de prellama no se incluye en los retardos del encendido registrados.

## 1.8 REACCIONES DE PRELLAMA

Los experimentos con motores de automóviles de Walcutt y Rifkin<sup>7</sup> pusieron de manifiesto que para la mayoría de los combustibles, la liberación de la energía de prellama fue aproximadamente del 10 al 15 por 100 del calor de combustión, pero que para el heptano, con 6 ml de plomo-tetraetilo para inhibir el autoencendido, la fracción de la energía liberada fue alrededor del 27 por 100. No hubo variación en la cantidad de energía liberada por la prellama, para combustibles sin aditivos, el aumentar la temperatura de admisión de 66° a 149° C y la relación de compresión se redujo hasta la correspondiente al autoencendido incipiente.

Las muestras de los gases de motores sin encendido y de la mezcla final en motores de encendido por chispa han mostrado que los productos de la reacción de prellama son los mismos cuando las presiones y temperaturas de

<sup>7</sup> Walcutt y E. B. Rifkin, Thermodynamic Analysis of Pressure Developed during Pre-flame Period, Ind. Eng. Chem., 43, 2844 (1951)

las mezclas de aire-combustible son comparables. La composición del gas de escape indica la descomposición del *n*-heptano suministrado en la mezcla

de aire-combustible a varias relaciones de compresión a que se llega en las temperaturas de mezcla alcanzadas al final de cada uno de los procesos de compresión sin encendido. Todos los productos de descomposición de la mezcla estequiométrica, excepto los peróxidos orgánicos, aumentan con la temperatura, hasta que la mezcla alcanza la temperatura de autoencendido para las condiciones impuestas. La llama fría y el autoencendido tiene lugar a las mismas temperaturas respectivas tanto para las mezclas pobres como para la correcta. Sin embargo, se cree que la llama azul, que tiene lugar únicamente con mezclas pobres, se produce también para la mezcla estequiométrica, pero demasiado cercana al autoencendido para que pueda ser detectada mediante el método empleado. La mezcla pobre produce alguno de los productos de prellama a temperaturas más bajas que para una mezcla estequiométrica y resulta la reacción de la llama azul, extendiéndose alrededor de un intervalo de unos  $5,5^{\circ}\text{C}$  al final del autoencendido.

La disminución de los aldehídos y cetonas más elevados, y de los peróxidos orgánicos en esta región, da lugar al rápido incremento del peróxido de hidrógeno y formaldehído cuando se aproxima al autoencendido.

Experimentos análogos con una mezcla del 0.5 de la estequiométrica de benceno y aire, en que la mezcla se comprimió hasta  $627^{\circ}\text{C}$  y 40 atm aproximadamente (justamente por debajo de las condiciones de autoencendido), dió lugar a la descomposición de solo el 1,5 por 100 de las moléculas del combustible suministrado. Aparentemente, el primer paso en

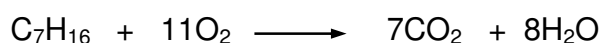
la descomposición del benceno es más difícil, pero una vez conseguida la destrucción del anillo bencénico, la reacción posterior es muy rápida.

Las mezclas pobres de metano y aire tienen una región de llama azul al comprimir la mezcla en un motor con una relación de compresión de 14,7.

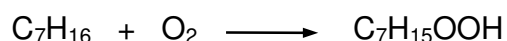
Las llamas frías del tolueno y etilbenceno obtenidas en un motor son muy débiles comparadas con las de las parafinas, exceptuando el etano.

El autoencendido de mezclas de  $\text{H}_2\text{O}_2$  se ha estudiado en un flujo permanente a través de un tubo. Aproximadamente de  $10^\circ$  a  $15^\circ$  C por debajo de  $556^\circ$  C, temperatura de autoencendido, la formación de agua aumentó con la temperatura y solamente se encontraron trazas de peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Los ensayos sobre motor indicaron que las relaciones de compresión con detonaciones incipientes eran algo más bajas que las del iso octano, pero la variación con la relación aire-combustible fue similar.

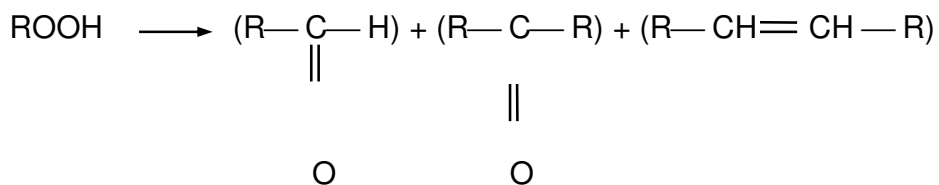
La reacción de combustión total del heptano con  $\text{O}_2$ ,



no pone de manifiesto las reacciones o productos intermedios que eventualmente aparecen en los productos finales de la reacción. Sin embargo, la combinación de una molécula de heptano con una molécula de oxígeno da lugar a una molécula de peróxido. Así



Los peróxidos ROOH se descomponen rápidamente a las temperaturas finales del gas como sigue :

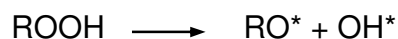


Peróxidos  $\longrightarrow$  aldehídos + cetonas + olefinas

y dan lugar a productos relativamente inertes.

El radical bivalente CO de los aldehídos y cetonas es químicamente diferente del óxido de carbono. Aquél aparece en los aldehídos y cetonas y también en algunas otras sustancias, denominándose los compuestos que lo contienen carbonilos.

Los peróxidos pueden descomponerse también dando lugar a radicales altamente excitados, como sigue



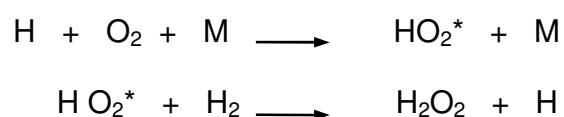
Estos radicales pueden reaccionar fácilmente con moléculas de hidrocarburos y producir una rápida oxidación del hidrocarburo.

En la descomposición de los peróxidos orgánicos se forma una cantidad considerable del aldehído más simple, HCHO (formaldehído). Una pequeña cantidad de estas moléculas se forma con un exceso de energía y radiación, indicando la presencia de una llama fría.

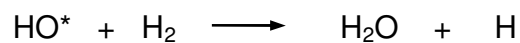
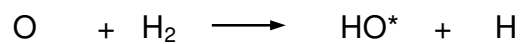
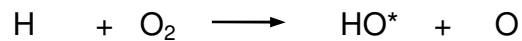
De las investigaciones espectrométricas de las reacciones de prellama del *n*-heptano se ha deducido que la intensidad de radiación integrada de la llama fría da un índice aproximado del aumento de la concentración de carbonilos en la región de la llama fría con heptano, cuando las condiciones de compresión no eran lo suficientemente severas para que apareciera la llama azul.

Las reacciones de prellama que tienen lugar entre la llama azul y el autoencendido se cree producen reacciones en cadena que aceleran la velocidad de reacción y producen la explosión de la mezcla final. Anzilotti y Tomsic estudiaron la combustión del hidrógeno y óxido de carbono en motores, y han concluido que *“ la reacción relativamente simple del hidrógeno y el oxígeno puede influir decisivamente en las reacciones que conducen a la detonación de los hidrocarburos “*.

De acuerdo con Lewis y Von Elbe<sup>8</sup>, las siguientes dos reacciones, que incluyen un tercer compuesto M y el radical altamente energético HO<sub>2</sub><sup>\*</sup>, tendrían lugar en procesos no explosivos en estado permanente en combinaciones de temperatura y presión menos severas que las que producen la detonación en los motores de combustión interna.



Un aumento de la temperatura o de la presión hacia el límite de autoencendido, o de ambas, producen las siguientes reacciones explosivas en cadena que dan lugar al autoencendido.



<sup>8</sup> B. Lewis y G. von Elbe, <<Combustion, Flames and Explosions: The Thermal Reaction>>, pág. 27, Academic Press Inc., Nueva York, 1951.

En la última reacción tiene lugar una liberación de energía apreciable.

Las experiencias de detonación y antidetonación con mezclas de óxido de carbono y aire con diversos contenidos de vapor de agua, indicaron que la tendencia a la detonación de estas mezclas está relacionada con la presencia de los radicales H, HO<sub>2</sub>\* y HO\*.

## 1.9 VELOCIDAD DE LA LLAMA O VELOCIDAD DE COMBUSTION

El tiempo necesario para que la llama se propague desde la bujía a través de la cámara de combustión depende del combustible, relación de mezcla, condiciones de presión y temperatura, turbulencia y diseño de la cámara de combustión. Una velocidad de combustión elevada permite un tiempo menor para que la mezcla final pierda energía por transferencia calorífica hacia las paredes de la cámara de combustión. Esto tiende a producir la detonación.

Una elevada velocidad de combustión disminuye el tiempo necesario para que la mezcla final alcance las condiciones requeridas para una inflamación espontánea mediante el proceso de autoencendido. Esto tiende a prevenir la detonación. No obstante, las velocidades de combustión elevadas requieren avances del encendido pequeños y óptimos, que dan lugar al quemado de la mezcla final más próximo a la posición en el punto muerto superior del pistón que con velocidades de combustión bajas. Esto también aumenta la tendencia a la detonación.

Si la velocidad de la llama es lo suficientemente elevada para permitir que atraviese la mezcla en un tiempo menor que el retardo del encendido necesario para que la mezcla final se autoinflame, bajo las condiciones de temperatura y presión continuamente crecientes, a las que está sometida, la mezcla final se quemará y la detonación de la combustión no tendrá lugar.

#### 1.10 RELACION AIRE-COMBUSTIBLE

Para el *n*-heptano, la tendencia al autoencendido es máxima en mezclas entre la estequiométrica y la que tiene el 75 por 100 del aire necesario. En un motor normal de admisión CFR, funcionando a 900 rpm, con refrigerante a 100° C, las curvas de respuesta de la mezcla basándose en una relación de compresión de detonación límite o incipiente (ver figura 1), indican que la relación de mezcla de detonación máxima es alrededor de un 10 por 100 rica

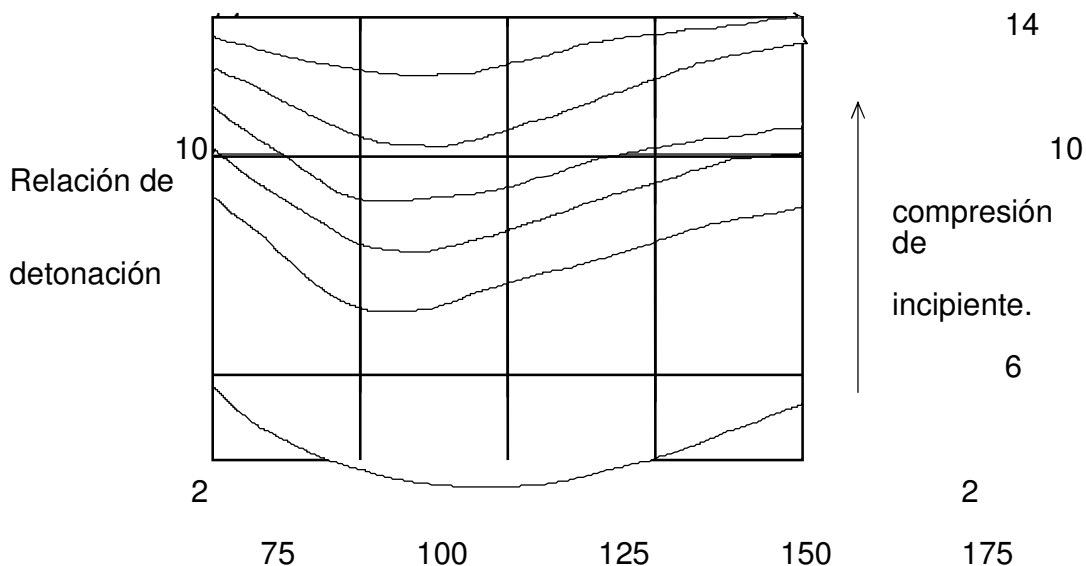


en combustible. En todos estos ensayos se utilizó un avance al encendido de  $28^\circ$  a  $30^\circ$  para todos los combustibles excepto el hidrógeno. En este caso la velocidad de la llama fue tan rápida que el encendido se retrasó hasta  $0^\circ$ .

Una distribución desigual de aire-combustible en un cilindro cualquiera, o entre diversos cilindros, condujo a la conclusión de que algunos cilindros tienen una tendencia mayor que otros a la detonación por la variación local de la relación aire-combustible.

Por lo general, para reducir la tendencia a la detonación en aquellos cilindros que tienen una mayor tendencia al picado es necesario retrasar un poco el avance al encendido o enriquecer la mezcla del carburador.

Las diversas fracciones de una gasolina tienen diferentes características antidetonantes. Las fracciones más volátiles tienen una calidad antidetonante más alta, se evaporan más completamente en el colector, y se distribuyen más uniformemente en los diversos cilindros. Las fracciones menos volátiles están en estado líquido y normalmente se distribuyen de forma irregular. Esto se complica por la tendencia del plomo-tetraetilo a concentrarse en las fracciones menos volátiles de la gasolina, debido a su punto de ebullición relativamente elevado. Consecuentemente, la tendencia al picado de los diversos cilindros puede variar apreciablemente.



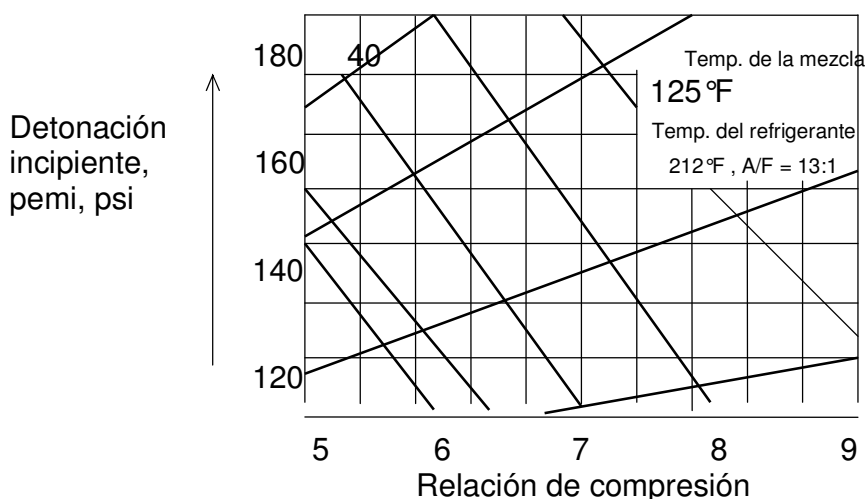
**FIGURA 1.** Variación con la relación de mezcla de la relación de compresión de detonación incipiente.

### 1.11 RELACION DE COMPRESION

Un aumento de la relación de compresión hace disminuir el volumen de gases residuales y consecuentemente disminuye la temperatura de la mezcla y también la historia de la temperatura de la mezcla final. Este efecto sobre la temperatura de la mezcla hace disminuir la tendencia a la detonación, pero el efecto del cambio en la relación de compresión sobre la temperatura de la mezcla final es mayor que el necesario para compensar el efecto de la disminución en la dilución con los gases residuales calientes. Pueden obtenerse temperaturas de mezcla más bajas mediante el barrido del espacio residual con mezcla fresca. Sin embargo, esto aumenta muy apreciablemente la tendencia a la detonación. Así, el efecto de dilución de

los gases residuales baja la tendencia a la detonación a pesar de aumentar la temperatura de la mezcla. La dilución del aire de admisión con gases de escape enfriados disminuye la tendencia a detonar si se emplean grandes diluciones (20 por 100).

La relación de compresión admisible con la detonación incipiente aumenta rápidamente al aumentar el número de octano del carburante, particularmente con los combustibles de índices de octano más elevados (ver figura 2).



**FIGURA 2.** Influencia de la relación de compresión sobre la tendencia a detonar, indicada por el índice de octano y la presión en el colector de admisión.

Esta característica es la misma tanto para presión constante en el colector de admisión como para una pemi constante.

En el caso de una pemi constante se requiere un aumento menor de calidad antidetonante del combustible para un incremento dado de la relación de compresión. Para una calidad antidetonante del combustible constante, la relación de compresión admisible puede aumentarse al reducir la presión en el colector de admisión. Así, para un combustible dado, se pueden obtener potencias de salida elevadas con relaciones de compresión bajas al sobrealimentar hasta la detonación incipiente. También pueden utilizarse relaciones de compresión altas al marchar en condiciones de estrangulamiento. El trabajo de sobrealimentación en el primer caso y la pérdida en el estrangulamiento en el segundo deben entrar en consideración si se desea máximo rendimiento.

#### 1.12 AJUSTE DEL ENCENDIDO

Cualquier variación en el instante del encendido hace variar la cantidad de carga quemada antes y después de que el pistón alcance el punto muerto superior, el avance en el encendido óptimo es el que da el rendimiento máximo, ya que el combustible se quema con la relación de expansión media más elevada. El avance al encendido demasiado grande aumenta el trabajo de compresión, lo que aumenta la temperatura de la mezcla aire-combustible, dando lugar a que la última parte de la mezcla se quemara con el pistón próximo al punto muerto superior. Ambas circunstancias aumentan la tendencia a la detonación. De aquí que la detonación pueda reducirse o

eliminarse haciendo menor el avance del encendido, lo que puede disminuir de forma clara la potencia de salida.

La relación entre el avance al encendido óptimo y el necesario para la detonación incipiente depende del combustible. Por tanto, una detonación incipiente no es una indicación de un avance del encendido óptimo, pues este avance para una detonación incipiente será mayor o menor que el avance del encendido óptimo a una velocidad cualquiera del motor, si el índice de octano del combustible es mayor o menor, respectivamente, que el requerido para el avance del encendido óptimo a la velocidad dada.

### 1.13 FORMA DE LA CAMARA DE COMBUSTION

Esta depende principalmente de la disposición de las válvulas, aunque la cabeza del pistón y el contorno de la cámara de combustión permiten variaciones considerables. Las diversas formas de las cámaras de combustión se clasifican como sigue (ver figura 3), siendo algunas adaptadas al empleo de dos o cuatro válvulas por cilindro :

1.13.1 Cabeza en T (prácticamente en desuso).

1.13.2 Cabeza en L.

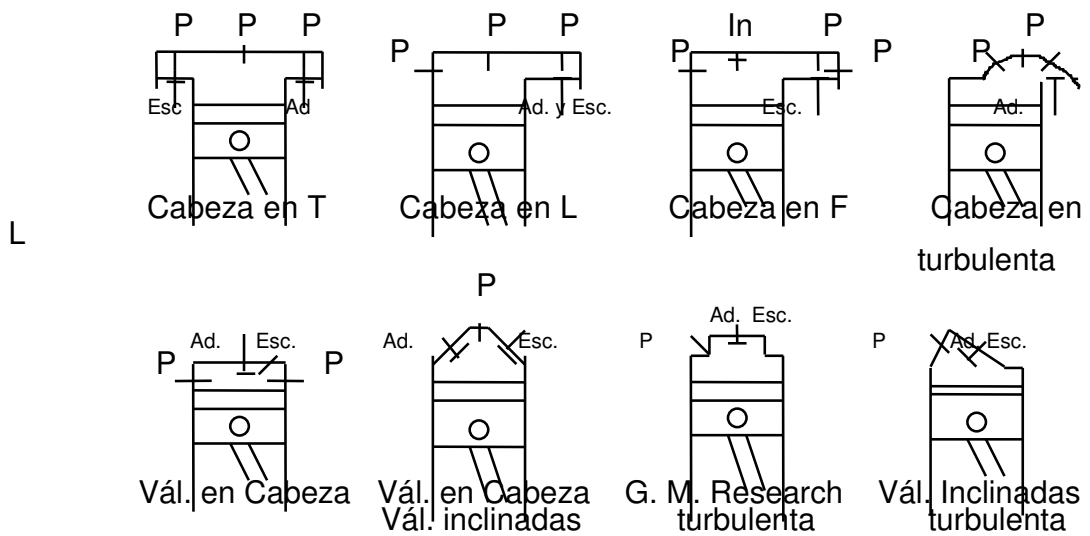
- Válvula de admisión al lado de la válvula de escape.

- Igual que la anterior, pero con cabeza de alta turbulencia.

1.13.3 Cabeza en F. Válvula de admisión sobre válvula de escape o en la cabeza del cilindro.

1.13.4 Válvulas en cabeza.

- Válvulas verticales con cámara de combustión cilíndrica.
- Válvulas inclinadas con cámara de combustión en cúpula.
- Válvulas verticales y cámara de combustión turbulenta.
- Válvulas de línea, pero inclinadas ; cámara de combustión turbulenta.



**FIGURA 3.** Formas de la cámara de combustión. La letra P indica la posible posición de la bujía.

El diseño de cabeza en T obliga al empleo de las relaciones de compresión más bajas para prevenir la detonación con un combustible dado, mientras que el diseño de válvula encamisada (ahora en desuso) permite la utilización de relaciones de compresión más elevadas. El motor con válvulas de seta tiene un punto caliente anormal en la cabeza de la válvula de escape, que queda eliminado en el motor de válvulas encamisadas.

El motor con cabeza en L no turbulenta es, por lo general, de relación de compresión más baja que el motor de válvulas en cabeza. Sin embargo, la introducción de cabeza en L muy turbulenta desarrollada por Ricardo, hace que estos dos diseños tengan características análogas desde el punto de vista de la detonación. Desde entonces se ha incrementado la turbulencia en los motores de válvulas en cabeza al variar la forma de la cabeza del pistón y las paredes de la cámara de combustión.

En general, cuanto más compacta es la cámara de combustión, mejores serán las características antidetonantes, ya que tanto el recorrido de la llama como el tiempo de la combustión serán más cortos. El diseño de la cámara de combustión de forma que la cabeza del pistón se aproxime mucho al cilindro al final de la carrera de compresión introduce un movimiento de

elevada turbulencia a la mezcla de aire-combustible durante la combustión. Esto aumenta apreciablemente la velocidad de combustión y reduce el tiempo de quemado. Si se diseña el espacio muerto para que sea ocupado por la mezcla final y está rodeado por paredes y cabeza del cilindro bien refrigeradas, es muy efectivo el retardo de la reacción de prellama en la mezcla final.

#### 1.14 LOCALIZACIÓN DE LAS BUJIAS

Las características detonantes de cualquiera de las cámaras de combustión, previamente descritas pueden variar apreciablemente al cambiar la localización de las bujías. En la cámara no turbulenta, la bujía debe colocarse de forma que el recorrido de la llama sea mínimo. Esto reduce el tiempo de la combustión a un mínimo, y la llama puede atravesar la mezcla final antes de que tenga lugar la detonación.

La bujía debe colocarse tan cerca como sea posible del punto más caliente de la cámara de combustión, que es la cabeza de la válvula de escape. La parte más caliente de la mezcla, junto a la válvula de escape, se quemará más rápidamente a causa de su temperatura elevada. De aquí que sea muy recomendable que el proceso de combustión se inicie cerca de la válvula de escape y que termine en el punto más frío de la cámara de combustión.

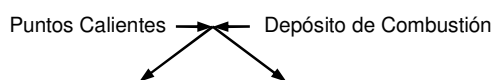
Una colocación central de la bujía con elevada turbulencia puede dar lugar a un proceso de combustión muy rápido y de un motor irregular. Cuando esto

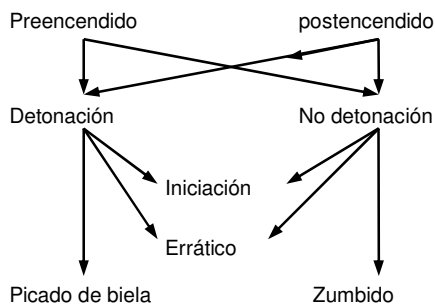


ocurre, hay que variar la localización de la bujía para aumentar el recorrido de la llama y el tiempo de la combustión, o bien aumentar la rigidez del motor. Dos bujías colocadas en lados opuestos del cilindro es mejor que una sola colocada en uno de los lados. La cámara de combustión en cúpula con válvulas inclinadas es adecuada para la colocación central de la bujía. Sin embargo, dos bujías, una colocada en la parte anterior y otra en la posterior y algo más próximas a la válvula de escape, son mejor que una, particularmente en los cilindros grandes.

#### 1.15 ENCENDIDO SUPERFICIAL

La detonación producida por una combustión anormal, con un combustible de índice de octano más bajo que el requerido, puede reducirse o eliminarse haciendo menor el avance al encendido, o producido al aumentar el avance al encendido. Así, la detonación en la combustión discutida antes se llama *picado de chispa*. Cualquier superficie caliente en la cámara de combustión tal como los electrodos de la bujía, la cabeza de la válvula de escape, o cualquier partícula de carbón ligeramente unida a la superficie de la cámara de combustión, flotando en la mezcla de aire-combustible, puede encender esta. Este fenómeno se llama *encendido superficial* (ver figura 21) y puede producirse antes (preencendido) o después (posencendido) del encendido normal, excepto en el caso de los electrodos de la bujía, que no puede haber posencendido.





**FIGURA 4.** Influencia del encendido superficial. Relaciones y terminología CRC.

#### 1.16 DETONACION POR ENCENDIDO SUPERFICIAL

Este tipo de detonación de la mezcla de aire-combustible puede detectarse variando el avance al encendido, y observando que no puede controlarse de esta manera. No se produce detonación por encendido superficial cuando este encendido anormal tiene lugar cerca de la bujía, y ambos encendidos se mezclan y confunden en la primera parte del proceso de la combustión. También, el encendido superficial en una zona lejos de la bujía puede tener el efecto de un doble encendido y dar lugar a subidas de presión más rápidas, pero sin detonación. Si quitado el contacto de encendido, el motor continúa funcionando más o menos regularmente, indica la presencia del encendido superficial. En los casos de encendido superficial severos, se desarrolla un encendido superficial *errático*. Este se origina normalmente por un sobrecalentamiento de la bujía, de la válvula de escape, o de la cabeza del pistón, dando lugar a un considerable deterioro de los pistones y de otras partes del motor.

Un *golpeteo violento* es producido por una o varias detonaciones de la combustión de forma irregular, pero muy agudos, que tienen su origen en el encendido por un depósito inmediatamente después del cierre de la válvula de admisión.

El picado de bielas es un ruido por irregularidad del motor de baja frecuencia causado por encendidos prematuros en uno o varios depósitos que da lugar a elevaciones de presión muy altas (alrededor de  $4,5 \text{ kg/cm}^2$  grado, en lugar de  $2,0 \text{ kg/cm}^2$  grado, de un caso normal) y se somete a la estructura del motor a severas tensiones con aumentos de la presión máxima de unos  $70 \text{ kg/cm}^2$ , para un funcionamiento normal, hasta unos  $90 \text{ kg/cm}^2$  para el picado de bielas. Una aceleración con gran apertura del estrangulamiento, después de una acumulación apreciable de depósitos de combustión, da lugar normalmente a un picado de bielas e irregularidad del motor.

#### 1.17 PREENCENDIDO

El término preencendido significa la iniciación prematura de la combustión por otro medio distinto del producido regularmente por el salto de la chispa entre los electrodos de la bujía. La forma más usual es la originada por puntos sobrecalentados que pueden estar localizados en las bujías, depósitos en la cámara de combustión o válvulas de escape. Si el motor continua funcionando después de cortar el encendido, es evidente que la combustión se inicia en algún foco distinto de la chispa eléctrica.

El fallo del motor debido al preencendido se origina por el aumento de la temperatura y la presión, y la duración de estas condiciones excesivas, lo que puede causar la fusión real de parte de la cabeza del pistón si éste es una aleación de aluminio, hasta perforarlo, o la destrucción de los segmentos y paredes del mismo, incluso la parte superior del pistón en este punto, particularmente causado cuando los huelgos pistón-cilindro son grandes y las hendiduras de los segmentos están alineadas dando lugar a un paso de gases. Sin embargo, el fallo típico producido por la detonación de la mezcla de aire-combustible es la erosión de la cabeza del pistón en la posición de la mezcla final, la superficie erosionada tiene la apariencia de haber sido soplada con arena, pero no fundida.

La temperatura de la válvula de escape, que es elevada aun en funcionamiento normal, crece rápidamente al aumentar el avance al encendido más allá del óptimo. De aquí que el preencendido en algún otro punto caliente puede dar lugar al preencendido en la válvula de escape. Los deterioros producidos por un preencendido severo pueden llegar desde la corrosión fisurante de la cabeza y asiento de la válvula hasta la rotura de la cabeza de la misma.

Evidentemente, un encendido de la mezcla de aire-combustible demasiado adelantado tendrá las mismas consecuencias que el preencendido. En uno y otro caso el motor detonará debido a la elevada presión que se produce antes del final de la carrera de compresión, o bien dará lugar a la detonación

de la mezcla final en combustión, si el motor está próximo a la detonación incipiente con el reglaje normal del encendido. La disminución del avance al encendido eliminará la detonación si el motor no presenta el preencendido.

## 1.18 EFECTOS DE LA DETONACION

1.18.1 Pérdida de potencia. Para una relación de compresión cualquiera puede obtenerse la máxima potencia de salida con un motor dado con el avance al encendido óptimo, siempre que el combustible tenga una calidad antidetonante lo suficientemente elevada para obtener una combustión libre de picado. Para un combustible con índice de octano bajo, el motor empezará a detonar para un cierto valor de la relación de compresión, y esta detonación subirá de intensidad al elevar la relación de compresión, creciendo también la potencia de salida hasta un máximo, correspondiente a cierta relación de compresión, y a continuación disminuirá al aumentar dicha relación de compresión.

Si se desea un funcionamiento libre de picado o con una detonación incipiente, es necesario disminuir más el avance al encendido. Esto da lugar a una ulterior reducción de la potencia de salida.

Puede obtenerse un aumento considerable de la relación de compresión, y más potencia de salida, al disminuir el avance al encendido para conseguir una detonación incipiente o picado ligero funcionando con el

estrangulamiento muy abierto, que el que se obtiene con el avance al encendido óptimo y bajo las mismas condiciones de picado. Aunque la potencia de salida y la economía de carburante con el estrangulamiento muy abierto son más bajas que las máximas posibles con un combustible sin detonación, el procedimiento anterior permite un avance al encendido óptimo, con las relaciones de compresión más altas para un funcionamiento con estrangulamiento parcial, lo que mejora la economía en dichas condiciones.

1.18.2 Predicción del funcionamiento con detonación incipiente a partir de la temperatura y densidad finales. Como la detonación de la combustión tiene lugar cuando el estado de la mezcla de aire-combustible final es tal que se autoenciende, dicho estado de la mezcla final dará un criterio para el funcionamiento con detonación incipiente.

La densidad final o el peso específico de la mezcla final se determina mediante su presión y temperatura, pero el estado de la mezcla final con relación a su autoencendido depende también del tiempo que la mezcla final ha estado sometida a las diversas temperaturas y presiones durante su compresión debida a las diversas temperaturas y presiones durante su compresión debida tanto al pistón como a la parte quemada de la carga.

Puede eliminarse el factor tiempo del estado de la mezcla final al suponer que la velocidad del motor, tamaño, turbulencia, relación de mezcla, etc., son

las mismas que para el motor con el que se determinan los estados de la mezcla final con detonación incipiente para el combustible dado.

Para determinar las características de un cilindro con detonación incipiente para una relación de compresión cualquiera y condiciones de alimentación de combustible y aire, también arbitraria, se supone la presión de sobrealimentación para una relación de compresión baja o la presión del colector estrangulada para una relación elevada, y se determina el estado de la mezcla final.

La relación de compresión óptima, para una instalación dada y un funcionamiento dado, depende de la resistencia que el vehículo presenta al movimiento (avión, automóvil, camión, etc.) en el que se instala el motor, y del tipo de aplicación concreta, tales como el recorrido de grandes distancias o altitud de vuelo.

#### 1.19 ELIMINACION DE LA DETONACION DE LA COMBUSTION

El modo más sencillo de eliminar la detonación de la combustión es disminuir el avance al encendido. Esto da como resultado una disminución del rendimiento térmico y de la potencia de salida.

Al disminuir el avance al encendido se necesita una mayor refrigeración, lo que puede dar lugar a calentamientos.

El estrangulamiento de un motor reduce el índice de octano requerido, ya que la densidad y la temperatura finales se reducen. El estrangulamiento disminuye el trabajo y el rendimiento térmico. La pérdida de trabajo por disminución del avance al encendido, o por estrangulamiento, con el fin de eliminar el picado, puede compensarse aumentando el tamaño del motor. Esto puede traer consigo un vehículo más pesado y unas características aún peores, ya que será necesario un mayor estrangulamiento, o mayor disminución del avance del encendido, para un motor grande.

1.19.1 enfriamiento de la mezcla de aire-combustible de admisión. Puede eliminarse la detonación de la combustión y aumentarse considerablemente la  $p_{emi}$ , con detonación incipiente, mediante la refrigeración de la mezcla antes de su admisión en el motor. Puede conseguirse esto con un enfriador entre el sobrealimentador y el motor, o con un enfriador entre dos pasos del alimentador, disminuyendo así el trabajo del sobrealimentador. Puede aumentarse la refrigeración del cilindro del motor, cabeza y válvulas, y este enfriamiento reduce la evolución de temperaturas con el tiempo de la mezcla final.

El método más simple de enfriar la carga de admisión es inyectar o pulverizar un fluido volátil, con calor latente elevado, en la carga, en el carburador, a la entrada del último paso del sobrealimentador o en las lumbreras de admisión



o en los cilindros. El agua es un refrigerante interno excelente, pero son mejores las mezclas de agua y metanol.

Se han utilizado refrigerantes internos en motores de autocamiones (principalmente en camiones y autobuses), en cuyo caso se utiliza un combustible de índice de octano más bajo que el requerido para un funcionamiento con el estrangulamiento muy abierto. Se han pulverizado refrigerantes internos en la mezcla antes de su inflamación obteniendo como resultado que un combustible de 20 ON (ASTM Motor method) dio las mismas

características de detonación incipiente que un combustible de 100 ON sin refrigerante interno. La complicación y costo del equipo adicional y de los líquidos han eliminado prácticamente la utilización de los refrigerantes internos en los motores de pistón.

1.19.2 Reducción del factor tiempo. Un método para eliminar el picado es reducir el factor de tiempo a un mínimo al introducir el combustible progresivamente en las diversas reacciones del aire, en la cámara de combustión, antes de la inflamación de cada sección. Texaco utiliza una válvula de admisión apantallada que produce un torbellino alrededor del eje del cilindro. El combustible se pulveriza en la cámara de combustión en una posición tal que el torbellino de aire mueve la mezcla de aire vapor hacia la bujía. Teóricamente, el combustible se pulveriza en el cilindro durante un tiempo igual al de un giro del torbellino de aire, para obtener la potencia

máxima de salida. El frente de llama se establece en algunas zonas entre la bujía y el pulverizador de combustible, permaneciendo aproximadamente en la misma posición mientras el torbellino arrastra el aire hacia el pulverizador y la mezcla hacia el frente de llama. Así, la mezcla final se forma inmediatamente antes de la combustión, de manera que se han experimentado combustibles que iban de 100 ON a 100 CN sin detonación en la combustión, en un motor de relación de compresión de 10 : 1 y con las mismas características, prácticamente para cada uno de los combustibles.

El problema inherente a este sistema es el de la inyección del combustible en el aire, que aumenta su densidad y disminuye el volumen específico durante cada proceso, y el de la obtención de la mezcla deseada de aire-combustible para una carga y velocidad cualquiera.

1.19.3 Aditivos antidetonantes. Estos compuestos, que son solubles en los hidrocarburos u otros combustibles, disminuyen la tendencia del autoencendido de la mezcla de aire-combustible. Este efecto se cree que es debido a la rotura de un número suficiente de las reacciones en cadena que producen las partículas o radicales altamente energéticos, lo que produce un retraso del autoencendido de la mezcla final y permite que la llama normal pase a través de ella sin que detone.

El principal agente de antipicado es el plomotetraetilo (TEL),  $(C_2H_5)_4Pb$ , con un punto de ebullición de 199°C, que fue encontrado por las investigaciones

de Midgley y Boyd como la sustancia más efectiva para la supresión del fenómeno de la detonación en la combustión. El TEL se mezcla siempre con el dibroetileno y el dicloroetileno, de forma que los compuestos de plomo formados durante la combustión son suficientemente volátiles para que la mayoría se expulsan con los gases de escape del motor.<sup>3</sup>

Las mezclas de gasolina etilada-aire contienen aproximadamente una molécula de TEL por 100.000 moléculas de aire gasolina. El TEL aparentemente no afecta al progreso de la llama en la primera parte del proceso de combustión normal, pero previene la inflamación repentina de la mezcla final.

El plomotetraetilo (TML),  $(C_2H_5)_4Pb$ , tiene un punto de ebullición de 110°C, y consecuentemente tiende a evaporarse con las fracciones de cabeza del combustible. Por tanto, los combustibles, con fracciones de cabeza de bajo índice de octano, se comportan mejor con el TML que con el TEL en vehículos que detonan a bajas velocidades del motor, mientras que el TEL tiende a quedarse con las fracciones de cola en el colector de admisión. Para ciertas gasolinas puede resultar más conveniente la mezcla de ambos (TEL-TML).

El metilciclopentadienilo-manganeso-tricarbonilo (AK-33X, de la Ethyl Corporation) es un agente antidetonante que tiene aproximadamente doble efecto que el TEL. Es también efectivo como antidetonante suplementario al

añadirlo a concentraciones máximas de TEL, en ciertos tipos de carburantes, si bien resulta costosa la sustitución del TEL.

1.19.4 Aditivos anti-depósitos contra encendido. El encendido superficial puede eliminarse utilizando un combustible que requiera mayores temperaturas en el encendido superficial. Los productos parafínicos se comportan a este respecto mejor que los aromáticos. Este método, por sí solo, obliga al empleo de elevados porcentajes de alquilatos (principalmente octanos) para obtener una mejora significativa.

El encendido superficial puede eliminarse también modificando los productos de la combustión, de forma que se incremente la temperatura para el encendido por depósitos. Sin embargo, el quitar una fracción de los aromáticos pesados parece ser la mejor solución.

La utilización del fosfato de tricresilo (TCP) como limpiador de plomo adicional que quita la suciedad de las bujías en los motores de pistón de aviación y en los de automóviles, al cambiar la naturaleza de los productos de la combustión, pone de manifiesto la posibilidad de los aditivos de fosfato para cambiar suficientemente los depósitos y reducir las tendencias al encendido superficial. Esto se consigue al cambiar las sales complejas de plomo, tales como  $2\text{PbO} \cdot \text{PbBr}_2$  (oxibromuro de plomo),  $\text{PbSO}_4$ ,  $\text{PbO} \cdot \text{PbSO}_4$  (oxisulfato de plomo), o  $\text{PbX}_2$ , donde  $\text{X}_2$  representa una solución sólida de

cloruro y bromuro de plomo, que catalizan la combustión de los materiales carbonosos en los depósitos, de forma que se hace mayor la temperatura de encendido sin llama del depósito. Además se reduce la velocidad y duración en que se libera la energía por la combustión sin llama (oxidación).

## 1.20 EVALUACION DE UN COMBUSTIBLE

1.20.1 Relación de compresión de máxima utilidad y crítica. Ricardo propuso la evaluación de los combustibles mediante la relación de compresión de máxima utilidad (HUCR) que podría emplearse en un motor dado y bajo un conjunto de condiciones determinadas.

*La relación de compresión de máxima utilidad* es la relación de compresión a la que se hace audible por primera vez la detonación, para ciertas condiciones de temperatura definidas y con el encendido y la mezcla ajustados para obtener el rendimiento máximo.

El método HUCR depende del motor dado y del conjunto de condiciones del ensayo. Esto conduce a comparar la detonación de un combustible desconocido con las mezclas de dos combustibles de referencia. En Inglaterra se utilizó el tolueno y el heptano. En los Estados Unidos se empleó la anilina y un combustible de referencia.

1.20.2 Índices de detonación ASTM-CFR. La Cooperative Fuel Research Committee (CFR) adoptó el *n*-heptano (índice de octano 0) y el 2,2,4-

trimetilpentano (índice de octano 100) como combustibles de referencia en el ensayo de la detonación. Así, una mezcla del 70 por 100 de isooctano y 30 por 100 de *n*-heptano en volumen, se dice que es un combustible de índice de octano (ON) igual a 70. Para combustibles de ON mayor de 100, se utilizan mezclas de isooctano y plomotetraetilo, y la escala de ON se define como sigue :

$$ON = 100 + 28.28 TEL / [1,0 + 0,736TEL + (1 + 1,472TEL - 0,035216 TEL^2)^{0,5}]^*$$

donde el TEL representa un milímetro de TEL por cada galón americano de isooctano. Además solo se toma la raíz positiva de la cantidad bajo el signo del radical.

Performance N°. es la evaluación de los combustibles de aviación con sobrealimentación, para combustible de ON igual a 100 o mayores. Se determina en función del TEL en isooctano a partir de la pemi con la relación de mezcla de máxima potencia. Véanse normas ASTM, pt. 7, D 909-60T, pág. 1329 (1961), y Tabla 8-3, Sec. 8-33.

El motor para el ensayo es un motor robusto de válvulas en cabeza, ciclo de cuatro tiempos y de un solo cilindro, con 82,55 mm de diámetro de cilindro, 114,3 mm de carrera. Es del tipo de compresión variable, que tiene un mecanismo que permite subir o bajar el cilindro, lo que se traduce en relaciones de compresión variables entre 3 : 1 y mayores de 15 : 1. Un único mecanismo de válvulas mantiene un huelgo de válvulas constante para

cualquier posición del cilindro. Se utiliza un carburador de diseño horizontal y chorro de sangrado de aire.

Tres unidades de cámaras de flotación pueden subirse o bajarse para proporcionar la relación de aire-combustible de picado máximo. Una de las unidades se utiliza para el combustible desconocido, que ha de catalogarse, y las otras dos unidades para las mezclas de combustibles de referencia.

Se utiliza un sistema de refrigeración por evaporación para mantener constante la temperatura de la camisa del cilindro. Se deja que el refrigerante hierva en la camisa del cilindro, y el vapor formado asciende hasta el condensador reflector, se condensa y vuelve al sistema.

1.20.3 Indicadores de intensidad de la detonación. Las primeras valoraciones de la intensidad de la detonación estaban basadas en el oído del operador. Las variaciones de agudeza auditiva y la evaluación de la intensidad relativa de la detonación condujeron al desarrollo de un dispositivo electromecánico con un vástago que reposaba sobre un diafragma de acero sometido a la presión de combustión. En presencia de la detonación el movimiento del vástago cerraba un circuito durante un periodo de tiempo e indicaba la intensidad de la detonación en un dispositivo de medida eléctrico.

Este aparato fue reemplazado por una cabeza captadora a presión magnetostrictiva y medidor eléctrico, y adoptado (1954) como el indicador normal ASTM de la detonación.

1.20.4 Métodos de laboratorio de evaluación de la detonación. La evaluación original del número de octano de los combustibles es el método Research, de denominación de ASTM, D908 (Tabla No. 3). Sin embargo, diversos combustibles ensayados por este procedimiento no se comportaron lo mismo en motores de automóvil experimentados en carretera, ya que las condiciones de funcionamiento del ensayo Research no fueron tan severas en algunos combustibles como las de los motores en carretera, con aceleraciones con el estrangulamiento totalmente abierto. Consecuentemente, se desarrolló el método Motor para obtener una mejor correlación entre los métodos de carretera y de laboratorio. Obsérvese la diferencia en las velocidades del motor, avance del encendido y temperatura de la mezcla en el colector de admisión.

La tendencia reciente en los combustibles y en las características de transmisión de los motores es tal que la mejor correlación la proporciona la media de los métodos Research y Motor.

**TABLA 3.** Principales condiciones del motor en ensayos del índice de detonación para gasolinas de automóvil y de aviación (Véase ASTM Standards; pt. 7, para instrucciones completas y variaciones admisibles)

---



Presión del Método Mezcla	ASTM N.º aire	N.º de Octano	Rpm	Relación de compresión	Temperatura,				
					Avance al encendido	Refrig. Admisión	Aire de		
Motor 1,055	D357	0-100	900	Variable	14-26	100	38+4	149	0,773-
Research 1,055	D908	0-100	600	Variable*	13	100	16-59*	.....	0,773-
	D1656	116	600	Variable*	13	100	16-59*	.....	0,773-
Sobreali. (mez. rica)	D909 D1948	85-100 161	1800	7 : 1	45	190	107	.....	3,824
Aviación (mez.pobre) barométrica	D614	70-100	1200	Variable	35	190	52	104	Lectura
encima								por	
HG								de	71 cm

\*Depende de la presión barométrica.

Nota : Se empleó aceite SAE 30 entre 1,76 y 2,11 kg/cm<sup>2</sup> y 57 °C para los tres primeros ensayos, SAE 50 a 4,22 kg/cm<sup>2</sup> para los dos últimos ensayos, con 11,60 y 10,55 para los ensayos cuarto y quinto respectivamente.

1.20.5 Sensibilidad del combustible y severidad del motor. El aumento de la velocidad del motor y de la temperatura de la mezcla, al pasar del método Research al método Motor (Tabla No. 3), aumenta apreciablemente la superficie de combustión y la temperatura de la mezcla final.

Consecuentemente, un combustible sensible a la temperatura da un índice notablemente más bajo en el método Motor. Así, la sensibilidad se define como la diferencia entre los números de octano evaluados por los dos ensayos de detonación. La mayor parte de los motores de automóvil tienen

unas características de combustión entre las que dan los métodos Research y Motor. Por tanto, conocida la severidad del automóvil y sensibilidad del combustible pueden estimarse las características de la detonación de carretera.

En general, las parafinas son los combustibles menos sensibles. Existen, sin embargo, algunas excepciones, particularmente los aromáticos, con relaciones de compresión críticas más altas. De aquí que fuera fortuito que dos parafinas, *n*-heptano e isoctano, se escogieran para definir la escala de índices de la detonación, pues la mayoría de los otros combustibles muestran unas características muy bajas de calidad antidetonante, cuando se les somete a condiciones severas de motor.

1.20.6 Mezcla de combustible. La mezcla de un combustible de buena calidad antidetonante con uno de baja calidad, presenta características detonantes comprendidas, por lo general, entre las de los dos constituyentes. La influencia de las adiciones de tal combustible sobre la relación de compresión de detonación incipiente, no es directamente proporcional a la cantidad añadida de combustible de alta calidad antidetonante. Así se necesita la adición de altos porcentajes de combustible de número de octano elevado para aumentar la relación de compresión crítica, muy por encima de la que tiene el combustible de baja calidad antidetonante.

1.20.7 Ensayo del índice de octano en carretera. El Modified Borderline Test Procedure (CRC Designation F-8B-943) para evaluación de combustibles en carretera, está basado sustancialmente en una intensidad de picado constante y catalogación del carburante desconocido entre dos mezclas de referencia. La evaluación se realiza durante una aceleración con el estrangulamiento totalmente abierto para una velocidad o velocidades dadas, utilizando el avance al encendido necesario a la velocidad dada, para obtener la deseada intensidad detonante, que es una determinada intensidad por encima de la detonación incipiente.

Se han desarrollado diversos métodos de cálculo de Road ON ( número de octano de carretera). Uno, basado solamente en los ON Research y Motor, es:

$$\text{Road ON} = 0,839 (0,5 \text{ Research} + 0,5 \text{ Motor}) + 18,8$$

Se han propuesto otras ecuaciones, con diversos grados de acierto, en las que se tienen en cuenta la influencia de las olefinas y aromáticos, e intervalo de destilación.

## CONCLUSIONES

El fenómeno de la detonación, es una limitante en cuanto a la máxima relación de compresión que puede utilizarse en los diseños de los motores de combustión interna de cuatro tiempos encendidos por chispa.

Es muy importante, la calidad del combustible, ya que un combustible con un número de octano elevado (NO=100), reduce la posibilidad de aparición del fenómeno de la detonación. La resistencia al picado, de los combustibles, no cumple de por sí con las exigencias de los motores actuales, por cuya causa, se añaden a los combustibles en su elaboración, pequeñas cantidades de determinadas sustancias antidetonantes como el tetraetilo de plomo. Pero la

utilización de aditivos con base de plomo, está limitada, ya que ésta sustancia es vertida con los gases de escape y, dada su toxicidad, en lugares de intenso tráfico puede ser perjudicial para el organismo humano (enfermedades del corazón, pulmones, cerebro, etc.). Debido a esto, la estructura química de las gasolinas se ha modificado, adicionando plomo en porcentajes mínimos, lo que ha obligado al diseño de motores con menor relación de compresión.

El fenómeno de la detonación, puede aparecer también cuando un motor funciona en condiciones extremas (cargas elevadas, temperaturas ambientales altas, adelanto al encendido, etc.).

El picado o detonación es perjudicial para el motor, ya que puede causar rotura en los órganos móviles y una pérdida considerable del rendimiento.

## 1. MANUAL DE MANTENIMIENTO

### 1.1 DESCRIPCION

El motor *Briggs and Stratton* de cuatro tiempos es un motor pequeño y ligero del tipo que se emplea en cortadoras de césped, sopladoras de nieve y aparatos industriales y domésticos semejantes. El motor se proporciona completo con tanques de combustible, arrancador de tirón y silenciador. Su diseño es de cabeza plana con monobloque de hierro colado y cabeza de aluminio con aletas. La cabeza, válvulas y carburador se pueden quitar fácilmente para su inspección y mantenimiento. Este motor reproduce aproximadamente a escala de 1/100, el funcionamiento y las características de flujo de combustible de un motor de automóvil de 350 HP.

## 2. PARTES DEL MOTOR

- Tanques de combustible.

- Carburador, filtro de aire, válvulas de corte de combustible.
- Bujía de encendido e interruptor de paro.
- Volante y cigüeñal.
- Carter, tapón de llenado y tapón de descarga de aceite.
- Soportes amortiguadores base del motor.
- Cabeza del cilindro, tornillo-pistón.
- Placa inferior, placa superior.
- Sistema sinfin-corona, suplemento.
- Bujes separadores de placas.
- Chumaceras (apoyos del tornillo sinfin).

### 3. REVISION Y CAMBIO DE ACEITE

El siguiente procedimiento se debe seguir cuando se revisa o cambia el aceite. Se debe revisar el nivel del aceite cada vez que se haga funcionar el motor. Si está por debajo del punto de rebose o derrame debe añadirse más aceite. Cambie el aceite después de las primeras cinco horas de operación. Esta medida elimina cualquier partícula de metal que se pueda haber depositado en el aceite durante el periodo de asentamiento. Después cambie

el aceite cada 25 horas de operación. Quite el tapón de descarga y vacíe el aceite mientras el motor está caliente. Vuelva a poner el tapón. Para llenar el cárter, coloque el motor en una superficie a nivel. Quite el tapón de llenado con un destornillador o una barra y llene lentamente el cárter hasta el punto de rebose. El cárter tiene una capacidad de 0,591 litros. Ponga de nuevo el tapón.

#### 4. MANTENIMIENTO DE LA BUJIA

La bujía se debe limpiar y calibrar su luz después de cada 100 horas de operación.

Quite la bujía con una llave para bujías de 20,6 mm (13/16 plg). Limpie cuidadosamente la bujía con un cepillo de alambre.

**NOTA: No se recomienda la limpieza de bujías utilizando máquinas que empleen chorros de abrasivos impulsados con aire.**



Lave la bujía con un disolvente, séquela después con aire, ajuste la luz a 0,762 mm (0,030 plg) con un calibrador y reinstale la bujía.

## 5. LIMPIEZA DEL FILTRO DE AIRE

El elemento filtrante del depurador de aire debe limpiarse a intervalos de 25 horas. Un filtro sucio de aire puede ocasionar pérdida de potencia y consumo excesivo de combustible. Desmonte el filtro de aire del motor teniendo cuidado de que no caiga suciedad en el carburador. Desarme el filtro y luego lave su elemento en keroseno o detergente líquido. Envuelva el elemento de espuma en un trapo y exprima hasta secarlo. Impregne dicho elemento de espuma con aceite limpio de motor. Exprímalo después para eliminar el exceso de aceite. Arme de nuevo el filtro de aire e instálelo en el motor.

## 6. AJUSTES DEL CARBURADOR

El carburador proporciona al motor la mezcla adecuada de aire y combustible en condiciones variables de carga y velocidad. El carburador del motor viene ajustado de fábrica y normalmente no requiere reajuste, a menos que se cambie o haya sido desarmado. Para el ajuste inicial, cierre cuidadosamente la válvula de aguja (girándola en el sentido del reloj) para evitar dañarla. Abra la válvula de aguja 1 1/2 vueltas (girándola en sentido contrario al del reloj). Cierre la válvula de marcha mínima (con rotación en el sentido del reloj).

**NOTA: El filtro de aire se debe quitar para efectuar el ajuste de dicha válvula.**

Abra la válvula de marcha mínima de 1/2 a 3/4 de vuelta. Para el ajuste final, arranque el motor y deje que se caliente unos minutos. Gire la válvula de aguja hacia adentro hasta que el motor falle (con mezcla pobre), luego gírela hacia afuera pasando el punto de operación uniforme hasta que el motor funcione con marcha irregular (con mezcla rica). Gire la válvula de aguja hasta el punto medio entre las marcas de mezcla rica y pobre, de manera que el motor funcione regularmente.

## 1. MANUAL DE LABORATORIO

Al terminar esta práctica de laboratorio, el estudiante de ingeniería mecánica podrá:

- Observar y analizar por qué la relación de compresión en los motores de cuatro tiempos encendidos por chispa, está limitada por el fenómeno de la detonación.
- Observar el comportamiento del motor y los efectos que sobre él se producen durante su funcionamiento, cuando se trabaja con gasolina de diferente octanaje, manteniendo una relación de compresión constante.
- Observar el comportamiento del motor y los efectos sobre él, durante su funcionamiento, cuando se varía la relación de compresión utilizando gasolina con un número de octano definido
- Observar el funcionamiento del motor cuando está detonando, utilizando mezclas de aire-combustible con exceso o escasez de aire (mezcla pobre ó mezcla rica).
- Afianzar los conceptos teóricos de la asignatura Máquinas de Combustión Interna, en cuanto a las características de funcionamiento de un motor otto de cuatro tiempos, cuando trabaja con una combustión anormal (detonación).
- Adquirir habilidad para detectar el fenómeno de la detonación cuando un motor de combustión interna de encendido por chispa, lo presenta en su funcionamiento.

- Adquirir la capacidad de corregir, tomar decisiones e implementar un programa de mantenimiento dirigido a eliminar las causas que producen el fenómeno de la detonación en los motores de combustión interna encendidos por chispa.

## 2. EQUIPO Y COMPONENTES

- Freno
- Motor *Briggs and stratton* de cuatro tiempos

### 3. PROCEDIMIENTO

#### 3.1 PARTES DEL MOTOR

- Tanques de combustible
- Carburador, filtro de aire, válvulas de corte de combustible
- Cabeza del cilindro, bujía de encendido, tornillo-pistón, sistema sinfin corona, manivela e interruptor de paro
- Volante y cigüeñal
- Carter, tapón de llenado y tapón de descarga de aceite
- Soportes amortiguadores base del motor

#### 3.2 PARTES DEL CARBURADOR

- Acelerador, válvula de marcha mínima, válvula de aguja, tornillo de ajuste de la velocidad mínima y el ahogador.

### 3.3 PARTES DEL FRENO

- Zapata
- Mariposa para tensionar freno

### 3.3 PRACTICAS DE SEGURIDAD

- No llene los tanques de combustible mientras el motor esté en marcha
- Limpie todos los derrames de gasolina tan pronto ocurran y deposite el trapo de limpieza en un recipiente de seguridad adecuado
- Utilice un embudo para llenar los tanques
- No opere sin carga el motor a su máxima velocidad (5000 RPM)
- No toque el cigüeñal mientras el motor esté trabajando y si lleva ropa suelta o no ajustada al cuerpo, manténgase alejado del eje giratorio
- No toque el silenciador hasta que el motor se haya enfriado
- Pare el motor utilizando el interruptor de paro
- Proporcione suficiente ventilación para el escape del motor
- Permanezca en frente del motor mientras esté en marcha





#### 4. COMPROBACION PREOPERACIONAL

Antes de arrancar el motor deben efectuarse las siguientes operaciones:

- Llene los tanques de combustible del motor con gasolina limpia y nueva, un tanque con gasolina extra y el otro con gasolina corriente, los tanques

están debidamente marcados, tenga mucho cuidado de no invertir la clase de gasolina con respecto a la marca del tanque

- Inspeccione el aceite del cárter. Este se debe llenar con aceite hasta el punto de rebose. Si el nivel de aceite es bajo, llénese con MS-SAE 30 de alto detergente

## 5. ARRANQUE DEL MOTOR

El siguiente procedimiento se aplica para arrancar el motor y realizar la primera prueba de laboratorio y debe seguirse en el orden indicado.

- Asegúrese de que el motor está ventilado adecuadamente
- Verifique que el sistema sinfin-corona esté en la posición de inicio de la prueba observando la marca en la corona (motor a condiciones normales de funcionamiento, marca verde)

- Verifique que la zapata del freno no esté haciendo contacto (motor con carga mínima)
- Cierre completamente el ahogador (o regulador de aire), girándole todo su recorrido en sentido horario y abra la válvula de corte de combustible, que corresponde al tanque con gasolina corriente
- Tire de la cuerda del arrancador rápida y uniformemente
- Abra completamente el ahogador, girándole todo su recorrido en sentido antihorario y tire de la cuerda nuevamente
- Cuando el motor esté funcionando, gire la mariposa tensionadora del freno hasta que la zapata haga contacto suave ofreciendo una resistencia al motor
- Comience a disminuir el volumen en la cámara de compresión, girando la manivela suavemente en sentido antihorario, teniendo mucho cuidado de no pasarse de la marca de mínimo volumen en la cámara de compresión (marca roja en la corona).
- Observe bien la posición de la válvula de aguja en el carburador, ya que ésta es la posición de funcionamiento regular del motor (punto neutro). Gire una vuelta la válvula de aguja en sentido horario (mezcla pobre), ahora gírela dos vueltas en sentido antihorario (mezcla rica), observe el

funcionamiento del motor, en cada uno de los tres puntos. Para volver la válvula de aguja a su posición inicial, gírela una vuelta en sentido horario.

- Cierre la válvula de corte de combustible y permita que el motor se apague solo para garantizar que el combustible depositado en la manguera y el carburador sea consumido completamente.
- Repita el mismo procedimiento anterior, pero ahora con gasolina extra (segunda prueba de laboratorio). No olvide colocar el sistema sinfin-corona en la posición inicial (marca verde en la corona) antes de poner el motor en marcha.
- Para una tercera prueba de laboratorio, repita el procedimiento anterior, pero ahora abriendo las válvulas de corte de combustible (gasolina extra y gasolina corriente) al mismo tiempo para garantizar una mezcla homogénea de las dos gasolinas.



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

DUBBEL H. Manual del constructor de Máquinas: Teoría de los motores de combustión interna, motores ligeros. 2ed. Barcelona. Editorial Labor S.A. 1980. Tomo II. p. 720

ICONTEC. Compendio sobre Dibujo Técnico. 2ed. Santafé de Bogotá. Editorial ICONTEC. 1994. p. 36

LICHTY, Lester C. Procesos de los motores de combustión. 1ed. Madrid. Editorial Ediciones del Castillo, S. A. 1970. p. 130

OBERT, Edward F. Motores de combustión interna, Análisis y Aplicaciones: Fundamentos sobre la combustión en los motores Otto. 8ed. Madrid. Editorial C.E.C.S.A. 1976. p. 170

PEREZ J. M., Alonso. Técnicas del Automóvil Motores. 3ed. Madrid. Editorial Paraninfo S. A. 1988. p. 215

